

油层出砂引起的采油套管破坏分析

高福平

章根德

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

王羽

石占中

(大港油田集团地质研究院 天津 300280)

提 要: 本文对采油出砂后形成的空洞引起套管破坏进行了分析, 指出如果空洞轴向尺度较大套管可视为细长杆, 套管受轴向力作用方可用压杆稳定理论进行分析, 而一般情况下应采用圆筒壳体屈曲的稳定性理论进行分析。

关键词: 油层出砂, 套管损坏

1 引言

在油田的开发中, 采油套管损坏现象时有发生, 造成了大量的经济损失。对套管损坏问题, 国内外不少学者进行了多方面的研究。概括起来主要有以下几个因素导致套管的损坏: 地层层间滑动、构造应力等地质因素; 高压注水、出砂因素; 井眼质量、管体质量因素; 以及化学腐蚀因素等等。

然而不同油田的套管损坏特点各异, 如我国胜利孤岛油田、大港港西油田许多井是由于生产时出砂造成套管损坏的。据统计, 随着出砂量的增加套管损坏井数也随之上升, 并且出砂井套管损坏的位置经常出现在空洞的位置。可见, 出砂造成的空洞与套管破坏有着密切的关系。本文对油井出砂引起的套管破坏的原因进行了分析。

2 油井出砂后空洞的形成

我国目前所开发的油田, 出砂层一般为弱胶结的疏松岩砂层。对于这种油层的出砂主要是由于油流的拖曳力先使油层产生局部破坏使其变成无胶结的散砂, 然后油流将散砂携带走并在炮孔附近形成小空洞, 小空洞的出现将导致应力集中, 随后空洞将进一步扩大。由于油层一般埋藏较深, 所受的垂直应力大, 所以当油层大量出砂形成空洞后, 上覆岩层失去下部岩层的支持将会产生垂直变形, 甚至产生坍塌。坍塌最终使上覆岩层产生拱形剖面。当地应力达到新的平衡后, 空洞将形成较稳定的几何形状, 如图1所示。可见空洞大部分存在于上覆岩层中, 油层却仍为散砂所覆盖。

高福平, 男, 1973.5 出生, 博士研究生

3 套管损坏分析

油井完井时，油层上覆岩层的重力主要由油层来承担。

然而当油层出砂形成空洞后，由原来油层承担的重力除了空洞中流体承担以一部分外，相当一部分将由套管承受。此时，套管受轴向压力的作用，可发生两种不同性质的损坏：一种可以近似地看成细长杆的压杆失稳屈曲，如图2所示；另一种是则可以视为圆筒壳体屈曲，如图3所示。

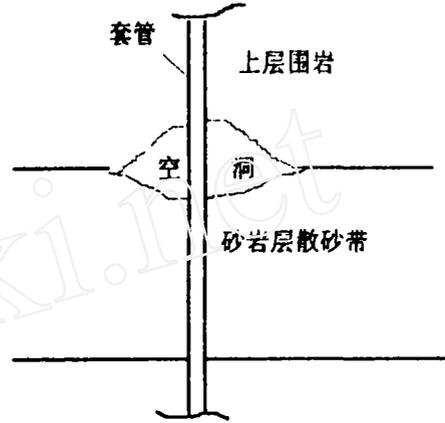


图1 油井出砂上覆层坍塌形成空洞



图2 细长杆受轴向压缩

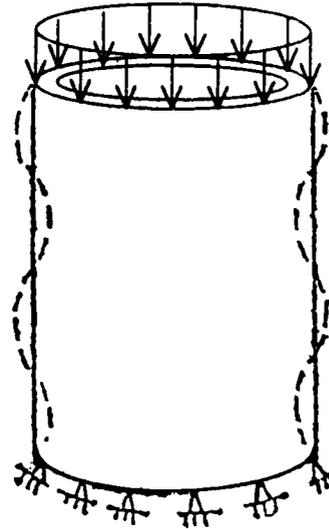


图3 圆筒壳受轴向压缩

3.1 细长杆受压模型

对于图2所示的套管屈曲，由于空洞所包围的套管的长径比很大，则挠曲线的近似微分方程可写成：

..

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} - Py = 0 \quad (1)$$

式中, E 为材料的杨氏模量, I 为形心轴惯性矩, P 为轴向荷载。

方程 (1) 的通解为:

$$y = A \sin Kx + B \cos Kx \quad (2)$$

上式中, $K = \sqrt{\frac{P}{EI}}$, 待定常数 A 和 B 由压杆的位移边界条件和变形状态确定。

长为 l 两端固定的细长杆的临界荷载为:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(0.5l)^2} \quad (3)$$

式中 l 为压杆长度, 即空洞高度。

上述解在如下的条件下才成立: 杆是细长的, 弯曲时所产生的应力在比例极限以内。只有符合此条件, 式(3)给出的压力临界值才是合理的。

压杆的临界应力值 σ_{cr} 为

$$\sigma_{cr} = P_{cr} / A = 4\pi^2 E \left(\frac{r}{l} \right)^2 \quad (4)$$

上式中 A 为杆的横截面积, $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ 称为惯性半径。

已知材料的比例极限及材料的弹性常数 E , 对于每一种特殊情况, 就可以很容易得到细长比的极限值。随着杆细长比的增大, 临界应力将不断地减小。所以对于杆件的屈曲的判别, 应该是采用临界应力来判别其稳定性的问题。

3.2 圆筒壳受压模型

对于如图 3 所示的圆筒的表面屈曲问题, 在下列基本假设:

- 1) 与壳体其它尺寸相比, 厚度很小;
- 2) 与壳体厚度相比, 侧向挠度很小;
- 3) 壳体的材料是均匀的、各向同性的并且服从虎克定律;
- 4) 弯曲前垂直于中面的直线, 弯曲后仍然是直线并且保持与中面垂直。即所谓直法线假设;

5) 壳体是一个理想的圆柱壳;

6) 横截面上的载荷是均匀分布并且同轴加载。

可导出圆筒壳受轴压的挠曲线微分方程为:

$$D\nabla^4 \omega - \nabla^4 \left(P_x \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + P_y \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + 2P_{xy} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right) + \frac{Et}{R^2} \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} = 0 \quad (5)$$

式中, $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ 为圆筒壳的刚度, ν 为材料的泊松比, ω 为圆筒横向挠度, t 为圆筒厚度, R 为圆筒半径, P_x 、 P_y 、 P_{xy} 为圆筒壳所受的中面力。

如果出砂形成的空洞的纵向尺度不大, 套管不能视为细长杆, 则套管的稳定性问题可看成一个半径为 R , 厚度为 t , 长度为 l 两端简支轴向受压圆筒壳的稳定性问题。中面力作用下的圆柱壳属于平面应力问题。

圆筒受轴向力作用时, 荷载只有 P_x , $P_x = -\sigma_x t$, 而 $P_y = P_{xy} = 0$, 所以, 方程 (5) 简化为:

$$D\nabla^4\omega + \sigma_x t \nabla^4 \frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} + \frac{Et}{R^2} \frac{\partial^4\omega}{\partial x^4} = 0 \quad (6)$$

必须指出, 方程 (5) 是以拉力为正推导出的, 而此处 σ_x 以压力为正。

筒支边的边界条件为:

$$x=0, l \text{ 时 } \omega = \frac{\partial^2\omega}{\partial x^2} = 0 \quad (7)$$

在边界条件 (7) 下, 方程 (6) 的解为 (注以下 σ_x 简为 σ):

$$\sigma = \frac{D}{t} \frac{x^2}{R^2} + \frac{E}{\lambda^2} \quad (8)$$

上式中, $\lambda = \sqrt[3]{12(1-\nu^2)} \sqrt{R/t}$ 。

为求 σ 的最小值, 利用 $\frac{d\sigma}{d\lambda} = 0$, 可得到关于线性问题的临界应力为:

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{R} \quad (9)$$

对于钢材可取 $\nu = 0.3$, 故可得:

$$\sigma_{cr} = 0.605 \frac{Et}{R} \quad (10)$$

此分析假定破坏为局部表面屈曲, 如图 4 所示。因此, 当空洞所包围的套管部分不能视为细长杆件时, 这一假定便是正确的。对于纵向尺度较长的空洞, 则套管在出现表面屈曲之前, 就会发生细长杆的整体屈曲。因此必须对两种屈服模态都进行验算。但是从情况分析来看, 只要出砂形成的空洞不是很长, 应该采取如图 3 所示的表面屈曲的形态来进行验算。

上述分析是按理想情况下的线性理论所得到的结果。当受压圆筒壳有轻度初始缺陷时, 它所能承受的最大荷载要比理论所得出的临界荷载低得多。试验已证明了理想模型的任何轻度不直都会使屈曲荷载明显降低, 有时会降低到理论临界荷载得百分之十几。其原因就在于, 在有初始缺陷的圆筒壳体受轴向压力时, 前面线性理论的分析模型中第二条和第三条假设就不成立, 此时必须采用有初始缺陷的圆筒壳大挠度方程才能描述。详细的讨

论可参见文献[1]~[3]。所以设计轴向受压套管必须考虑初始缺陷的影响。工程上采用下列公式来计算临界荷载：

$$\sigma_{cr} = C \frac{Et}{R} \tag{11}$$

其中C为初始缺陷影响系数。

对于没有初始缺陷的情况，C=0.6。于是式(11)就化为圆筒壳屈曲临界应力的经典解答式(9)。理论和试验都证明，初始缺陷的影响随壳体的半径和厚度比增加而明显增大，如图4所示。

工程设计上考虑非弹性引起的强度折减，可采用“长柱研究委员会手册”^[4]中所列的经验公式来计算。

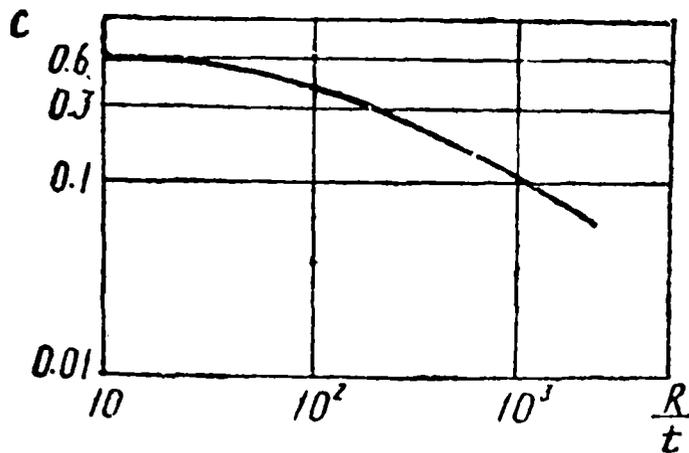


图4 有初始缺陷轴向受压圆筒壳的屈曲应力系数

4 结语

工程设计中仅仅从压杆稳定性角度来判断套管的稳定问题是过于简单的。本文还从圆筒的表面屈曲的角度分析了油层出砂引起的采油套管的损坏。

到底出砂后形成的地下空洞是否会引引起崩塌而毁坏油井套管，这是个十分复杂的问题。它还与岩层的强度相关，与油井套管与水泥衬砌与岩体的胶结情况及岩体中裂隙的分布情况等相关。但总的来说，采取恰当的防止油层出砂的措施和出现空洞后采用挤入水泥浆形成人工井壁等措施，对防止油井出砂引起的套管损坏是有效的。

参考文献

- 1 唐家津等, 结构稳定理论, 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- 2 黎绍敏, 稳定理论, 北京: 人民交通出版社, 1989.
- 3 张福港译, 铁木辛柯著, 弹性稳定理论, 北京: 科学出版社, 1958.
- 4 B.G. Johnston, Guid to Design Criteria for Metal Compression Mechanics, 3rd ed New York: John, Wiley and Sons, Inc, 1973.

www.cnki.net